原子时尺度分析研究

章宇[1,2*]，董绍武[1,2,4]，袁海波[1,2,3]，王燕平[1,2]，赵书红[1,2]，宋会杰[1,2]

(1. 中国科学院国家授时中心，西安 710600；2.中国科学院时间频率基准重点实验室，西安 710600；3.中国科学院大学，北京 100049；4.中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049)

摘要： 守时型原子钟主要包括氢原子钟和铯原子钟，为进一步探究不同类型守时原子钟计算时间尺度相关性能，本文开展全氢钟及氢铯联合时间尺度研究，文章首先依据国际权度局BIPM 发布的 d 公报将氢原子钟进行分类，针对分类结果分别运用原子时尺度理论方法计算全氢钟时间尺度，并给出分析结果。随后计算全铯钟时间尺度，并分析探究两种不同的氢铯联合钟组时间尺度。结果表明，基于频率漂移量较小的氢钟组形成的时间尺度波动范围小，且稳定度优于频率漂移量较大的氢钟组形成的时间尺度。氢铯联合形成的时间尺度稳定度优于全铯钟时间尺度，不同的氢铯联合钟组计算得到的时间尺度结果相近。

关键词： 氢原子钟；铯原子钟；频率漂移；时间尺度；氢铯联合

中图分类号： TH752 **文献标识码：** A

1 引言

时间与人类的社会生活息息相关，在科技、经济、通信、计量等各方面影响深远[1]。在全球卫星导航系统方面，由于测时测距体制，高精度时间成为关键要素[2-3]，在基础研究方面，精密时间研究涉及天文学、物理学等自然学科。在民生领域方面，交通、电力等时间同步、频率校准应用广泛[4-5]。因此开展高精度时间保持技术研究具有非常重要的现实意义。

原子钟是开展守时工作的重要基础，原子钟主要分为基准型原子钟和守时型原子钟，国家授时中心目前的守时型原子钟主要包括氢原子钟及铯原子钟，守时型原子钟具有连续的信号输出、性能各异的特点[6-7]，其中氢原子钟短期稳定度较好[8-9]，铯原子钟长期稳定度较好，二者为守时系统中最重要的组成单元。

统筹原子钟钟组资源，产生一个连续、稳定、可靠、均匀的时间基准，即原子时尺度，原子时尺度降低了单台原子钟的不确定性，具有更高的频率稳定度，其是守时系统驾驭控制的重要参考，对于守时系统的连续可靠稳定运行具有重要意义。本文主要开展不同守时型原子钟时间尺度性能分析研究。

2 原子时尺度理论

假定参与计算原子时尺度 TA 有 N 台原子钟，则 TA 计算表达式如下[10]：

$$TA(t)=\sum_{i=1}^{N}w_i(t)\left\{h_i(t)+h_i^{'}(t)\right\} \quad (1)$$

基金项目： 国家天文科学数据中心；中国科学院“西部之光”人才项目（XAB2021YN22）；中国科学院青年创新促进会（2020402）；

收稿日期： 2022-11-10；修订日期：20**-*-**

作者简介：章宇，男，助理研究员，主要研究时间保持技术与方法和数据处理方法. Email:yuzhang@ntsc.ac.cn

$$\sum_{i=1}^{N} w_i = 1 \quad (2)$$

其中，$h_i(t)$ 表示第 i 台原子钟的读数，$i=1,2,3,\ldots,N$，$h_i^{'}$ 表示相位修正项，w_i 表示钟 i 的权重。

相位修正项 $h_i^{'}$ 利用二次模型来描述可表示为：

$$h_i^{'} = x_i(t_k) + B_i(t)(t-t_k) + \frac{1}{2}C_i(t)(t-t_k)^2 \quad (3)$$

由上式，在 t_k 时刻，钟 N_i 由相位、速率、频漂三要素共同组成，该式还可以表示为[11]：

$$h_i^{'} = \hat{x}_i(t_k) + \hat{B}_i(t)(t-t_k) + \frac{1}{2}\hat{C}_{ik-1}(t)(t_k - t_{k-1})\cdot(t-t_k) + \frac{1}{2}\hat{C}_{ik}(t)(t-t_k)^2 \quad (4)$$

其中，$\hat{x}_i(t_k)$ 为 t_k 时刻，钟 N_i 相对于参考频率源的相位估计。

$\hat{B}_i$ 为 $[t_k, t]$ 时间间隔中钟 N_i 相对于参考频率源的频率估计。

$\hat{C}_{ik}$ 为 $[t_k, t]$ 时间间隔中钟 N_i 相对于参考频率源的频率漂移估计。

$\hat{C}_{ik-1}$ 为 $[t_{k-1}, t_k]$ 时间间隔中钟 N_i 相对于参考频率源的频率漂移估计。

以上频率和频率漂移估计可以通过最小二乘拟合方法获得。

对于权重，可依据预报钟差与实际钟差的绝对偏差设定。表示如下：

$$\varepsilon_i = \left| x_i(t) - x_i^{'}(t) \right| \quad (5)$$

$$w_i = \frac{1/\varepsilon_i}{\sum_{i=1}^{N} 1/\varepsilon_i} \quad (6)$$

式（6）同时结合式（2），实现归一化控制。

3 实验分析

3.1 基于不同频率漂移情况下的全氢钟组时间尺度分析

选择中国科学院国家授时中心 8 台氢原子钟进行研究，BIPM 公布的 8 台氢原子钟实验数据段前 6 个月频率漂移值如表 1，由表 1 ，H326、H340、H339、H341 这 4 台氢原子钟频漂漂移值相对较大，H067、H296、H082、H080 这 4 台氢原子钟漂亮漂移值相对较小。

为研究氢钟不同频率漂移情况下的时间尺度，将频率漂移值相对较小的 4 台氢原子钟构成的联合钟组表示为 HE1，4 台频率漂移值相对较大氢原子钟构成的联合钟组表示为 HE2，实验数据采样间隔为 1h，周期长度为一个月。

表1 BIPM公布的8台氢原子钟实验数据前6个月频率漂移值

(单位:ns/day/30days)

Table 1 The frequency drift values of 8 hydrogen masers announced by BIPMabout 6 months

MJD	H326	H340	H339	H341	H067	H296	H082	H080
59514	5.2162	6.4070	4.7035	7.8937	0.5857	0.3685	****	****
59544	5.5264	6.4294	4.7909	7.8157	0.5839	0.3696	****	****
59579	5.6303	6.4479	4.7279	7.5581	0.5705	0.5366	****	****
59609	5.3201	6.4291	4.6864	7.3680	0.5809	0.4961	****	****
59634	5.0081	6.3567	4.7681	7.3016	0.5818	0.2616	1.0878	0.0798
59669	5.1529	6.2779	4.7222	7.4022	0.5673	0.0043	0.9925	0.0782

图 1 为基于不同频率漂移情况氢钟组形成的时间尺度对比图，图 2 为基于不同频率漂移情况氢钟组形成的时间尺度稳定度对比图，表 2 为两种情况时间尺度 ALLAN 偏差值。

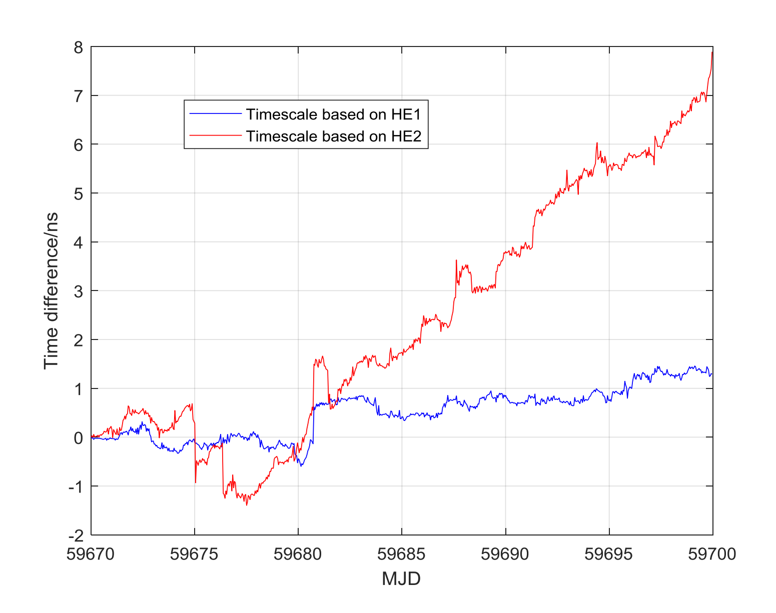


图1基于不同频率漂移情况氢钟组时间尺度对比图

Fig1 Time scale comparison based on different frequency drift of hydrogen maserensemble

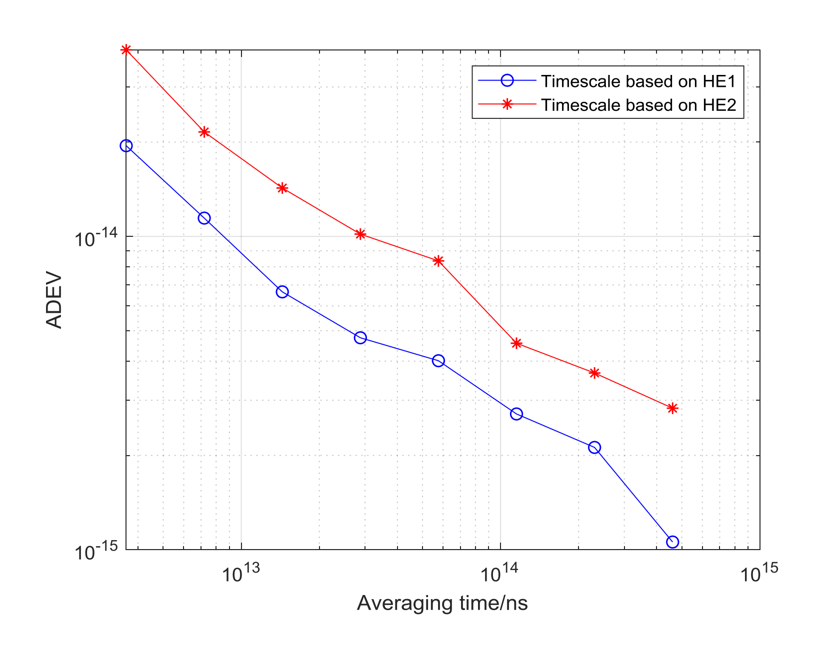


图2基于不同频率漂移情况氢钟组时间尺度稳定度对比

Fig2 Comparison of time-scale stability of hydrogen maser ensemble based on different frequency drift conditions

表2两种不同频率漂移氢钟组时间尺度的ALLAN偏差比较

Table 2Comparison of ALLAN deviation values on time scales of two different frequency drift hydrogen maserensembles

Averaging Time/h	ADEV	
	Timescale based on HE1	Timescale based on HE2
1	1.95e-14	3.94e-14
2	1.14e-14	2.16e-14
4	6.65e-15	1.43e-14
8	4.75e-15	1.02e-14
16	4.01e-15	8.36e-15
32	2.71e-15	4.56e-15
64	2.12e-15	3.66e-15
128	1.06e-15	2.83e-15

由图 1，频率漂移相对较小氢钟组 HE1 计算形成的时间尺度波动范围在－1ns~+2ns，波动相对较小，且无剧烈变化，频率漂移相对较大氢钟组 HE2 计算形成的时间尺度波动范围在－2ns~+8ns，波动相对较大，且具有明显的趋势项。分析其原因，由于频率漂移属于相位估计的二次项，当频率漂移值相对较大时，如果对其估计不准，加之二次幂累积，即会造成结果的趋势项明显。由图 2 及表 2，频率漂移相对较小氢钟组 HE1 计算形成的时间尺度长短期稳定度优于频率漂移相对较大氢钟组 HE2 计算形成的时间尺度。小时稳优于 2E-14，天稳优于 4E-15。

3. 2 氢铯联合时间尺度分析

首先选择中国科学院国家授时中心 4 台铯原子钟 Cs3436、Cs3089、Cs2976、Cs2980 进行研究，数据周期长度为一个月，采样间隔为 1h，利用原子时尺度计算方法计算得到全铯钟组时间尺度如图 3。

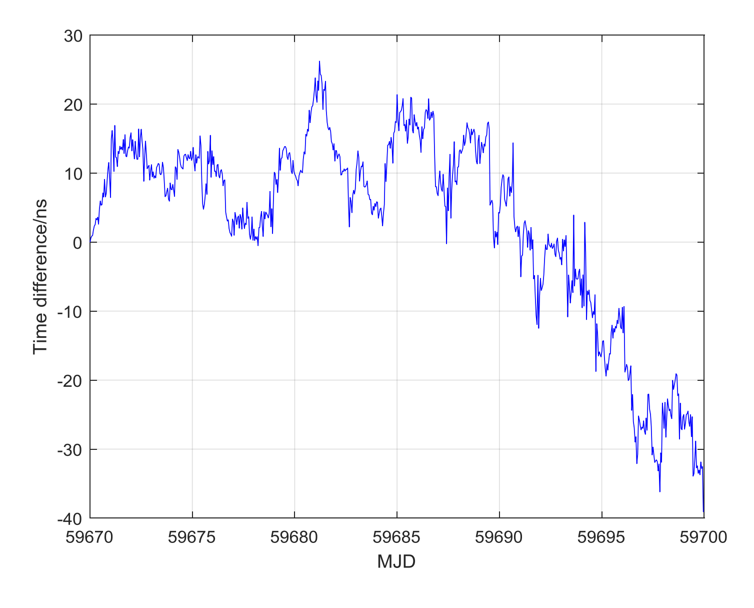


图3全铯钟组时间尺度

Fig3Cesium clock ensemble time scale

由图 3，基于全铯钟形成的时间尺度波动范围在－40ns~+30ns，对比 3.1 节全氢钟形成

的时间尺度，波动范围较大，且短期波动相较于全氢钟时间尺度更为剧烈，这是由铯原子钟本身性能决定的，铯原子钟具有良好的长期稳定度，但短期稳定度普遍低于氢原子钟。

为进一步研究氢铯联合时间尺度，制定两种氢铯融合策略，一种是利用本节 4 台铯原子钟与 3.1 节 4 台频漂量较小的氢钟构成的氢铯联合钟组表示为 HCs1，另一种是利用本节 4 台铯原子钟与 3.1 节频漂量较大的氢钟构成的氢铯联合钟组表示为 HCs2。基于 HCs1 钟组形成的氢铯融合时间尺度如图 4，基于 HCs2 钟组形成的氢铯融合时间尺度如图 5，图 6 为全铯钟时间尺度与两种氢铯融合时间尺度稳定度对比图。表 3 为全铯钟时间尺度与两种氢铯融合时间尺度统计值，包括最大值、最小值及峰峰值。表 4 为两种氢铯融合时间尺度的 ALLAN 偏差值对比。

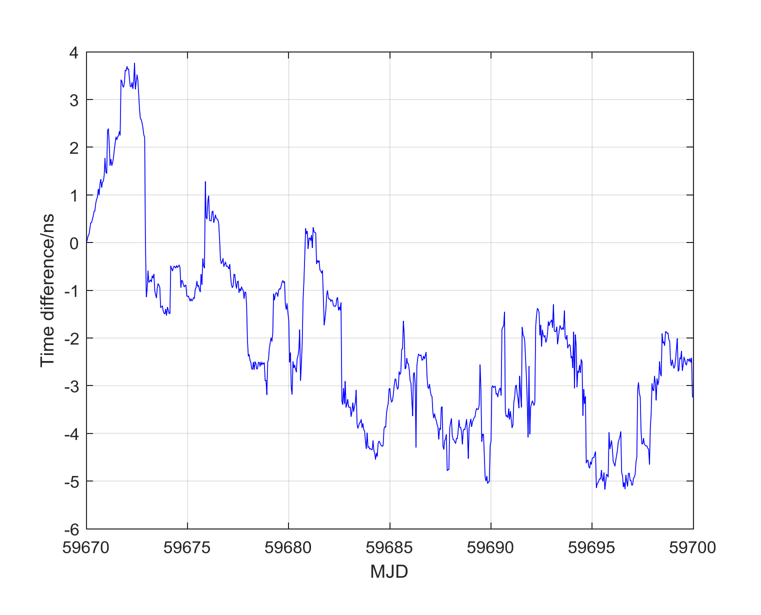


图4基于HCs1钟组时间尺度

Fig4Thetime scale based on HCs1 clock ensemble

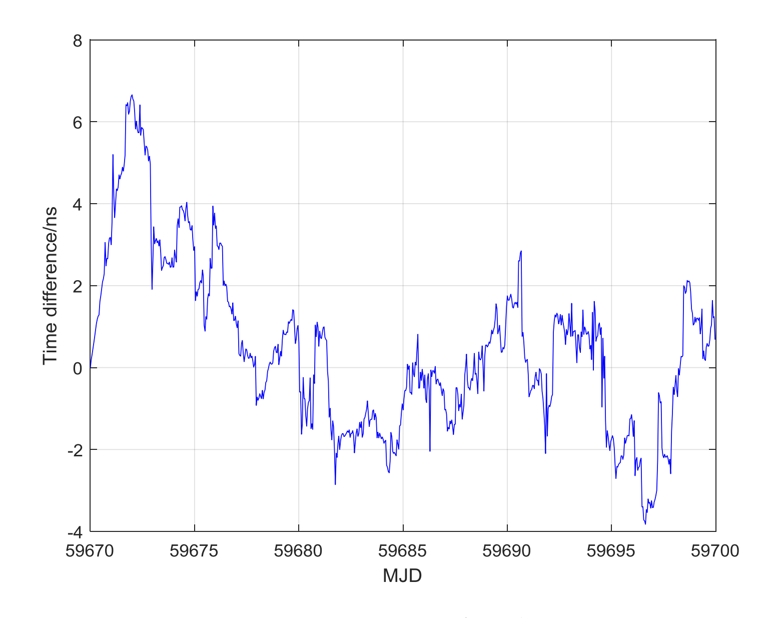


图5基于HCs2钟组时间尺度

Fig5The time scale based on HCs2 clock ensemble

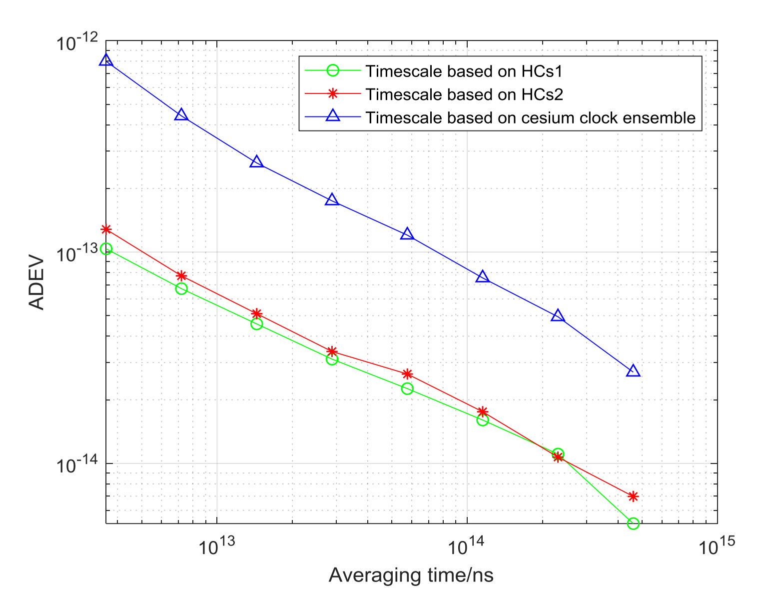


图6基于不同钟组时间尺度稳定度对比图

Fig6Time scale stability comparison based on different clock ensembles

表3不同钟组计算时间尺度统计值

Table3Statistics based on time scales of different clock ensembles

Statistical value	Timescale based oncesiumclockensemble	Timescale based onHCs1	Timescale based onHCs2
Maximum	26.2207	3.7623	6.6565
Minimum	-39.1252	-5.1729	-3.8235
Vp-p	65.3459	8.9352	10.4800

表4两种不同氢铯联合钟组时间尺度的ALLAN偏差比较

Table 4ALLAN deviation comparison on time scales of two different hydrogen - cesium combined clock ensembles

Averaging Time/h	ADEV	
	Timescale based on HCs1	Timescale based on HCs2
1	1.04e-13	1.28e-13
2	6.71e-14	7.72e-14
4	4.57e-14	5.11e-14
8	3.11e-14	3.39e-14
16	2.26e-14	2.65e-14
32	1.60e-14	1.76e-14
64	1.11e-14	1.07e-14
128	5.19e-15	6.98e-15

由图 4，基于 HCs1 钟组时间尺度波动范围为－6ns~+4ns 之内，由图 5，基于 HCs2 钟组时间尺度波动范围为－4ns~+7ns 之内，两种融合波动范围均较小，且波动的趋势也较为接近，由表 3 基于 HCs1 钟组时间尺度峰峰值为 8.9352ns，基于 HCs2 钟组时间尺度峰峰值为 10.4800ns，而基于全铯钟时间尺度峰峰值达 65.3459ns，说明氢铯联合产生的时间尺度效果良好，互相接近。由图 6，氢铯联合的稳定度优于单纯铯钟组形成的时间尺度，同时结合表 4，可得出两种氢铯联合钟组的时间尺度稳定度相当，进一步说明氢铯融合时间尺度具有

良好的稳定性。

4 结语

本文主要研究分析了不同频率漂移情况下全氢钟组时间尺度特点，以及不同氢铯联合时间尺度的性能对比研究，从实验结果来看，基于频率漂移较小的氢钟形成的时间尺度波动范围较小、趋势项较小，对于频漂较大的氢钟形成钟组计算得到的时间尺度趋势项明显。同时也可以看到，氢铯联合时间尺度，无论是铯钟组合频率漂移较大的氢钟、还是组合频漂较小的氢钟，融合结果接近，波动范围较小，稳定度统计值相近且优于全铯钟时间尺度。

参考文献

[1] 赵书红, 董绍武, 白杉杉, 高喆. 一种优化的频率驾驭算法研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1457-1464.
ZHAO S H,DONG S W, BAI S S, GAO Z. Research on An Optimized Frequency Steering Algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(5): 1457-1464.

[2] 董绍武.守时中的若干重要技术问题研究[D].北京:中国科学院研究生院（国家授时中心）, 2007.
DONG S W.Study on Several Important TechnicalIssues in Time-keeping [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2007.

[3] 陈颖,卢鋆,刘成,邵搏,张键,原彬.北斗卫星导航系统国际民航标准重点问题研究与指标验证[J].天文研究与技术,2022,19(05):447-457.
CHEN Y, LU Y, et al.Research and Assessment on Key Issues of ICAO SARPs forBeiDou Navigation Satellite System[J]..Astronomical Research & Technology, ,2022,19(05):447-457.

[4] 章宇,王燕平,袁海波等.时间频率专业数据集[J].中国科学数据(中英文网络版),2020,5(02):176-186.
ZHANG Y, WANG Y P, YUAN H B, et al.Time and frequency professional data set[J]. China Scientific Data (Chinese and English Online Edition), 2020, 5(02): 176-186.

[5] 章宇,袁海波,王燕平,董绍武,张继海.时间频率科学数据管理控制与应用[J].大数据,2021,7(06):120-127.
ZHANG Y, YUAN H B, WANG Y P,The management control and application of the time frequency scientific data.[J]Big Data Research,2021,7(06):120-127.

[6] 赵书红. UTC (NTSC)控制方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院（国家授时中心）, 2014.
ZHAO S H. Research on UTC(NTSC) control method[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2014.

[7] 白杉杉. 基于铯喷泉钟的频率驾驭方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院（国家授时中心）, 2020
BAI SS. Research on Frequency Steering Method Based on CesiumFountain Clock [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2020

[8] 白杉杉,董绍武,赵书红,张继海. 主动型氢原子钟性能监测及评估方法研究[J]. 天文学报,2018,59(06):58-68.
BAI SS, DONG S W, ZHAO S H, ZHANG J H. Research on the Method of Performance Monitoring and Evaluation for Active Hydrogen Maser[J]. Chinese Journal of Astronomy, 2018,59(06):58-68.

[9] 章宇,董绍武,宋会杰等.关于氢原子钟的钟差预报研究[J].仪器仪表学报,2020,41(11):90-97.
ZHANG Y, DONG S W, SONG H J, et al. Research on the clock error prediction of hydrogen atomic clock[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 90-97.

[10] G. Panfilo, “The coordinated universal time,” IEEE Instrum. Meas.Mag., vol. 19, no. 3, pp. 28-33, 2016.

[11] PANFILO G ,HARMEGNIES A , TISSERAND L . A new prediction algorithm for the generation of International Atomic Time[J]. Metrologia, 2012, 49(1):49-56.

Analysis of atomic time scale

ZHANG Yu [1, 2*],DONGShaowu[1,2, 4],YUAN Haibo[1, 2],WANGYanping[1, 2],
ZHAO Shuhong[1,2],SONGHuijie[1,2]

(1. National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Lab of Time-frequency Standard of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;4. School of Astronomy and Space Science of University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Timekeeping atomic clocks mainly include hydrogen masers and cesium atomic clocks. In order to further explore the time-scale performance of different types of timekeeping atomic clocks, this paper carried out a study on the hydrogen maser and the hydrogen-cesium combined time scale . Firstly, the hydrogen maser was classified according to the d bulletin issued by BIPM. According to the classification results, the atomic time-scale theory is used to calculate the hydrogen maser time scale, and the analysis results are given. Then the time scales of cesium clocks are calculated and two different time scales of hydrogen-cesium combined ensembles are analyzed and explored. The results show that the time-scale fluctuation range of the hydrogen maserensemble based on the small frequency drift is smaller, and the stability is better than the time scale of the hydrogen maserensemble based on the larger frequency drift. The time scale stability of the hydrogen-cesium combination is better than the total cesium clock, and the result of different hydrogen-cesium combination time scale clocks are similar.

Keywords:hydrogen maser; cesium atomic clock;frequency drift; time scale; hydrogen-cesium combination